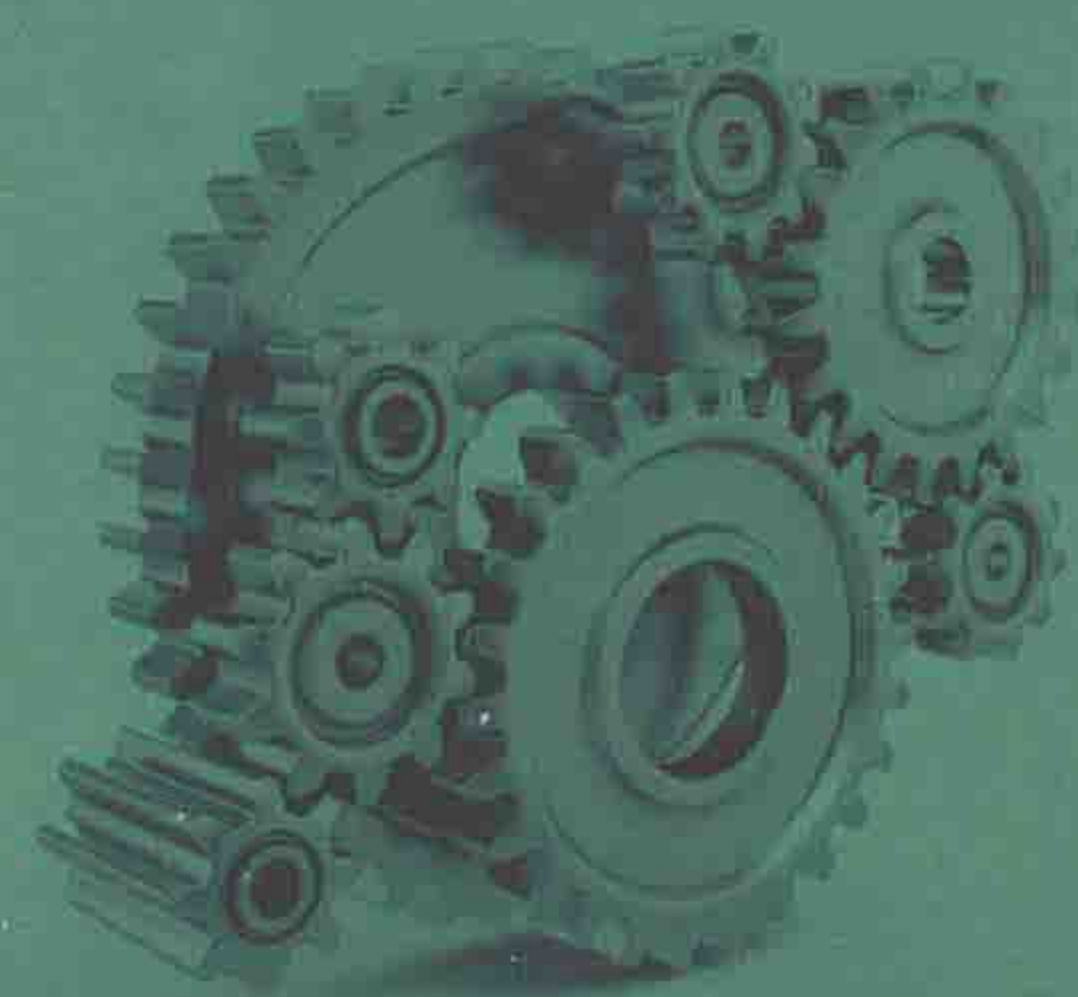


失效分析



—— 基础与应用

第2版

2th edition

孙智 任耀剑 隋艳伟 编著

■ Failure Analysis: Basises and Applications ■



失效分析——基础与应用

第2版

孙智 任耀剑 隋艳伟 编著

机械工业出版社

本书主要应用失效分析工程学的观点和方法,系统地介绍了金属零件在使用过程中发生断裂、磨损、腐蚀失效的形貌特征、影响因素、预防措施及具体的分析方法,简要地介绍了金属零件加工缺陷对失效的影响。本书强调断口分析在失效分析中的重要意义,分析了断口位置、特征与零件失效的关系。本书着重于各类失效特征的描述和失效分析思路及其方法的运用,强调理论与实践的结合,书中给出了较为丰富的典型失效分析实例,针对性强。

本书可供从事金属零件设计、制造、使用、失效分析及质量管理的有关人员使用,也可供高等院校材料科学与工程、机械设计与制造等专业师生参考,并可作为高等院校失效分析有关课程及各类培训班的教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

失效分析:基础与应用/孙智,任耀剑,隋艳伟编著. —2版.
—北京:机械工业出版社,2017.6
ISBN 978-7-111-57031-8

I. ①失… II. ①孙…②任…③隋… III. ①失效分析
IV. ①TB114.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第127032号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:陈保华 责任编辑:陈保华

责任印制:常天培 责任校对:胡艳萍 李锦莉

北京京丰印刷厂印刷

2017年7月第2版·第1次印刷

169mm×239mm·19印张·356千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-57031-8

定价:39.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

策划编辑:010-88379734

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

第2版前言

《失效分析——基础与应用》一书自2005年出版以来，承蒙广大读者垂爱，已经重印12次，有多所大学将其选作教材或指定为教学参考书。十多年来，书中所用的一些相关标准已经有了较大变动，金属零件的使用环境也越来越复杂，关于失效分析的技术和方法也有了一些发展，作者在这十多年间的工作也有了一定发展，对一些失效机理、失效分析方法的基本认识也有所提高，尤其是增加了更多的实践经验，也得到了一些使用该书的高校师生的建议。鉴于此，在机械工业出版社的支持下，对《失效分析——基础与应用》进行了修订。全书的基本思路和基本框架保持不变，在介绍失效分析基础知识的基础上重点突出应用；按照新的标准对相关内容进行修订；增加了近年来的科研成果和作者对实际分析工作的一些新的体会；调整、增加了新的十多年来的失效分析统计数据；调整了部分实例，使该书内容涉及面更宽一些。

值得一提的是，分析中国知网（CNKI）近十年出版的相关论文，导致金属零部件早期失效的诸多因素中，设计选材不当和加工质量不良依然是主要因素，与前一个十年的统计结果相比，不仅没有降低而略有上升。这说明，进行深入的失效分析，确定零部件早期失效的原因，减少不必要的损失，不仅意义重大，而且任重道远。

本书修订工作由中国矿业大学孙智、任耀剑和隋艳伟完成，部分研究生参加了标准的核定和数据的统计工作。作者感谢所在学校的教授们和研究生们的支持与协作！

在本书的编写过程中，参考了国内外同行的大量文献和相关标准，在此谨向有关人员表示衷心的感谢！

由于作者水平有限和时间比较紧，书中的错误和纰漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

孙 智

第1版前言

金属零件在使用过程中失去其原有的功能，就导致失效。金属零件的失效直接关系到设备与产品的使用寿命及工程安全，一些重大的失效事件还会导致人身伤亡和财产的巨大损失。人们在长期的生产科研实践中认识到，必须系统地研究各类金属零件的失效形式、影响因素、分析的方法和预防的措施，才可望在创造优质产品、增加经济效益以及确保安全方面获得成功，并在这些方面积累了丰富的经验，逐步形成了失效分析工程学的基本体系。

随着现代科学技术的迅猛发展，失效分析作为一门新兴的边缘学科在工程上正得到日益广泛的应用与发展。为了提高金属零件的质量和设备安全可靠性的，国内外对金属零件的失效现象进行了大量的分析与研究，日益完善了失效分析的基本理论与技术方法。应用失效分析技术，可以指导各类产品的规划、设计、选材、加工、寿命评估、检验及质量管理等工作，同时，失效分析又是制定技术规范、科技发展规划以及法律仲裁的依据。由于产品复杂程度和工作能力的提高以及使用环境的苛刻，金属零件失效分析的工作正向着多因素非线性耦合交互作用的方向发展，失效分析越来越需要多学科、多方面的交叉与综合，需要失效分析知识更广泛的普及，需要更多的人来关注和从事这一方面的研究和工作。

本书是作者根据多年来从事失效分析工作的体会和积累的技术资料，并在多方面支持与协助下编写的。本书的初稿曾作为讲义印刷2次，在中国矿业大学使用5年。全书共分八章，第1和第2章为失效分析的基础知识，第3章为失效分析的基本方法，第4和第5章为断裂失效分析，第6章简要介绍了磨损与腐蚀失效分析，第7章分析了金属零件加工制造缺陷对失效的影响，第8章为失效分析的实例。鉴于失效分析工作实践性强、分析思路的重要性等特点，在全书的编写过程中，作者着重于各类失效特征的描述和失效分析思路及其方法的运用，对失效的机理只作简单介绍。

本书由中国矿业大学孙智、江利、应鹏展编著。第1至第5章由孙智执笔，第6章由应鹏展执笔，第7章由江利执笔，第8章由孙智、江利、应鹏展执笔。唐大放、康学勤、任耀建、丁海东、杨锋参加了部分章节和图片的整理工作，徐州美驰车桥有限公司邵承恩提供了部分实物图片。

作者特别感谢中国矿业大学教授朱敦伦先生，正是他的指导和他的著作把作者引领到失效分析这一专业。感谢机械工业出版社的陈保华编辑，是他的辛勤工作使得本书得以出版。本书引用和参考了许多专家、学者和单位的有关资料、论

著，在此向他们致以诚挚的谢意！

本书的出版得到了江苏省、中国矿业大学博士后研究基金和江苏省自然科学基金（BK200403）的资助。

由于作者水平有限，书中缺点错误之处一定不少，敬请各位读者批评指正。

作者

目 录

第2版前言

第1版前言

第1章 概论	1
1.1 失效与失效分析	1
1.1.1 失效	1
1.1.2 失效分析	2
1.2 失效分析的社会经济效益与意义	4
1.2.1 失效分析的社会经济效益	4
1.2.2 失效分析的意义	6
1.3 失效分析对材料科学与工程促进作用	9
1.4 失效分析的现状与发展趋势	11
1.4.1 国外的失效分析工作	12
1.4.2 我国的失效分析工作	13
1.4.3 失效分析的发展趋势	15
第2章 失效分析基础知识	17
2.1 机械零件失效形式与来源	17
2.1.1 机械零件失效形式及原因	17
2.1.2 机械零件失效的来源	20
2.2 应力集中与零件失效	21
2.2.1 应力集中与应力集中系数	21
2.2.2 应力集中对零件失效的影响	23
2.2.3 降低应力集中的措施	26
2.3 残余应力与零件失效	28
2.3.1 残余应力	28
2.3.2 残余应力的产生	28
2.3.3 残余应力的影响	35
2.3.4 消除和调整残余应力的方法	37
2.4 材料的韧性与断裂设计	39
2.4.1 低应力脆断及材料的韧性	39
2.4.2 断裂韧性在失效分析中的应用	42
2.5 应力分析与失效分析	43
2.5.1 应力状态分析与强度理论	43

2.5.2	单向拉(压)应力	46
2.5.3	平面拉应力	49
2.5.4	弯曲应力	50
2.5.5	扭转应力	52
2.5.6	交变应力	54
2.5.7	接触应力	58
第3章	失效分析基本方法	61
3.1	失效分析的思路及方法	61
3.1.1	失效分析的原则	61
3.1.2	相关性分析的思路及方法	63
3.1.3	系统工程的分析思路及方法	64
3.1.4	数理统计的分析思路及方法	71
3.2	失效分析的程序	74
3.3	断口分析	77
3.3.1	断口处理方法及断口分析的任务	78
3.3.2	断口的宏观分析	81
3.3.3	断口的微观分析	88
3.3.4	宏观分析与微观分析的辩证应用	98
第4章	静载荷作用下的断裂失效分析	102
4.1	过载断裂失效分析	102
4.1.1	过载断裂及断口的一般特征	102
4.1.2	影响过载断裂断口特征的因素	104
4.1.3	扭转和弯曲过载断裂断口的宏观特征	108
4.1.4	过载断裂断口的微观特征	110
4.2	材料致脆断裂失效分析	110
4.2.1	回火脆性断裂	110
4.2.2	冷脆金属的低温脆断	114
4.2.3	第二相质点致脆断裂	116
4.3	环境致脆断裂失效分析	117
4.3.1	应力腐蚀开裂	117
4.3.2	氢致脆断	126
4.3.3	低熔点金属的接触致脆断裂	130
4.3.4	高温长时致脆断裂(热脆)	131
4.3.5	蠕变断裂	133
4.4	混合断裂失效分析	136
第5章	疲劳断裂失效分析	138
5.1	疲劳断裂失效的基本形式和特征	138
5.1.1	疲劳断裂失效的基本形式	138

5.1.2	疲劳断裂失效的一般特征	139
5.2	疲劳断口形貌及其特征	141
5.2.1	疲劳断口的宏观特征	141
5.2.2	疲劳断口各区域的位置与形状	144
5.2.3	疲劳断口的微观特征	148
5.3	疲劳断裂的类型与鉴别	152
5.3.1	机械疲劳断裂	152
5.3.2	腐蚀疲劳断裂	154
5.3.3	热疲劳断裂	157
5.4	疲劳断裂的原因与预防措施	159
5.4.1	疲劳断裂的原因	159
5.4.2	疲劳断裂的预防措施	161
第6章	磨损与腐蚀失效分析	164
6.1	磨损失效分析	164
6.1.1	磨损及磨损失效	164
6.1.2	磨损失效分析	165
6.1.3	磨损失效的预防措施	168
6.2	腐蚀失效分析	175
6.2.1	腐蚀及腐蚀失效	175
6.2.2	腐蚀失效的基本类型	178
6.2.3	腐蚀失效分析及预防措施	185
第7章	金属零件加工缺陷与失效	193
7.1	铸造加工缺陷与失效	194
7.1.1	常见铸造加工缺陷及形貌	194
7.1.2	铸造加工缺陷对失效行为的影响	198
7.1.3	石墨形态对铸铁件热疲劳行为的影响	199
7.1.4	铸造缺陷致使机械零件失效实例	202
7.2	锻造加工缺陷与失效	204
7.2.1	常见锻造加工缺陷及形貌	204
7.2.2	锻造加工缺陷对失效行为的影响	206
7.2.3	锻造加工缺陷致使机械零件失效实例	207
7.3	焊接加工缺陷与失效	210
7.3.1	常见焊接加工缺陷及形貌	210
7.3.2	焊接加工缺陷对失效行为的影响	214
7.3.3	焊接加工缺陷致使机械零件失效实例	214
7.4	热处理缺陷与失效	217
7.4.1	常见的热处理缺陷及形貌	217
7.4.2	热处理缺陷对失效行为的影响	219

7.4.3 热处理缺陷致使机械零件失效实例	219
7.5 切削加工缺陷与失效	223
7.5.1 常见切削加工缺陷	223
7.5.2 切削加工缺陷对失效行为的影响	223
7.5.3 切削加工缺陷致使机械零件失效实例	225
7.6 磨削加工缺陷与失效	226
7.6.1 常见磨削加工缺陷及形貌	226
7.6.2 磨削加工缺陷对失效行为的影响	227
7.6.3 磨削加工缺陷致使机械零件失效实例	227
第8章 失效分析实例	229
8.1 M5-36-11No. 20.5 风机轴断裂分析	229
8.2 矿井提升绞车减速齿轮早期开裂分析	234
8.3 振动压路机驱动桥弧齿准双曲面齿轮的失效分析	238
8.4 电站锅炉联箱导汽管爆管失效分析	243
8.5 供热管道不锈钢波纹管膨胀节失效分析	250
8.6 潜水泵叶轮腐蚀破裂分析	255
8.7 白铜 BFe30-1-1 凝汽器管腐蚀失效分析	261
8.8 IHI 卧式离心机叶片开裂失效分析	266
8.9 高压气缸外缸螺栓断裂分析	269
8.10 磨煤机变速箱高速轴断裂分析	278
参考文献	282

第 1 章 概 论

1.1 失效与失效分析

1.1.1 失效

各类机电产品的机械零部件、微电子元件和仪器仪表元件等，以及各种金属及其他材料形成的构件（工程上习惯地统称为零件，以下简称零件）都具有一定的功能，承担各种各样的工作任务，如承受载荷、传递能量、完成某种规定的动作等。当这些零件失去了它应有的功能时，则称该零件失效。

零件失效（即失去其原有功能）的含义包括三种情况：

- 1) 零件由于断裂、腐蚀、磨损、变形等，从而完全丧失其功能。
- 2) 零件在外部环境作用下，部分的失去其原有功能，虽然能够工作，但不能完成规定功能，如由于磨损导致尺寸超差等。
- 3) 零件虽然能够工作，也能完成规定功能，但继续使用时，不能确保安全可靠性。例如：经过长期高温运行的压力容器及其管道，其内部组织已经发生变化，当达到一定的运行时间时，继续使用就存在开裂的可能。

失效在英文中称为 *failure*，意指达不到预期的或需要的功能，或不足，按词义可译为失灵、失事、故障、不足等。在我国有时俗称损坏、事故等。上述名词的含义有许多相似之处，常常混用。为防止混乱，在 1980 年 12 月召开的中国机械工程学会机械产品失效分析会议上，我国学者正式确定为失效。

应特别指出，失效与事故是两个不同的概念，必须加以区别。事故是指一种后果，它可以是由于失效引起的，也可能是其他原因造成的。

传统的零件失效多指金属零件，即由名义上的各向同性材料制成的零件。随着材料科学的发展，复合材料的应用比重越来越大，在 21 世纪，复合材料将超过金属材料的使用量，从而在材料中占有主导地位，因此应加强对复合材料失效的研究。复合材料的失效，又称为复合材料破坏，指复合材料在经过某些物理、化学过程后（如载荷作用、材料老化、温度和湿度变化等）发生了形状、尺寸性能的变化而丧失了预定的功能。复合材料是一种各向异性的多相复合体，失效过程要比通常的各向同性材料复杂得多，它涉及组分材料的性能、复合的方式、工艺条件、界面性能、载荷的性质与环境因素等，不可能只用一种失效模式来描

述复合材料失效，绝大多数情况下是几种失效模式同时存在和发生。近些年，国内外在复合材料失效行为与断裂机理方面进行了大量的工作，如美国编写了一套复合材料失效分析手册，详细介绍了复合材料的失效分析技术与方法。失效分析的结果将对复合材料制件的设计、制造提供很好的技术反馈。由于复合材料断裂的复杂性，研究人员很难将断口微观特征与应力状态相联系，主要在宏观范围寻找断裂的规律性。

微电子机械系统（MEMS）在近年来取得了飞速的发展。当前对于 MEMS 器件的研究已经取得了很大进展，但就整体而言，尚未能够实现 MEMS 产品的成功商品化。各种工况下失效问题是 MEMS 商品化的一大障碍。MEMS 是一门全新的技术，对于其失效物理机制的了解还很少，特别是对尺度效应和表面效应影响的认识还很初步。正确认识 MEMS 的失效模式是进行可靠性评估的前提条件。当前，对 MEMS 器件及系统的失效研究正逐渐引起人们的极大关注。对于 MEMS 失效的研究，不但包括宏观机械中所面临的一些问题，而且还有一些 MEMS 所特有的现象，需要进一步研究。

1.1.2 失效分析

失效分析通常是指对失效产品为寻找失效原因和预防措施所进行的一切技术活动，也就是研究失效现象的特征和规律，从而找出失效的模式和原因。失效分析是一门综合性的质量系统工程，是一门解决材料、工程结构、系统组元等质量问题的工程学。它的任务是既要揭示产品功能失效的模式和原因，弄清失效的机理和规律，又要找出纠正和预防失效的措施。

按照失效分析工作进行的时序（在失效的前后）和主要目的，失效分析可分为事前分析、事中分析和事后分析。

1) 事前分析，主要采用逻辑思维方法（如故障树分析法、事件时序树分析法和特征-因素图分析法等），其主要目的是预防失效事件的发生。

2) 事中分析，主要采用故障诊断与状态监测技术，用于防止运行中的设备发生故障。

3) 事后分析，是采用实验检测技术与方法，找出某个系统或零件失效的原因。

通常所说的失效分析是指的事后分析，本书介绍的内容也侧重于此。实际上，事前分析和事中分析必须以事后分析积累的大量统计资料为前提。

失效分析学是人类长期生产实践的总结，是研究失效分析预测预防的理念、理论、技术、方法和管理的交叉综合的分支学科。与其他学科相比，有两个显著的特点：一是实用性强，即它有很强的生产使用背景，与国民经济建设存在着密切关系；二是综合性强，即它涉及广泛的学科领域和技术部门，图 1-1 给出

了失效分析学与其他学科的关系。

应该指出，失效分析与生产现场所进行的废品分析在所涉及的专业知识、采用的思想方法及分析手段等方面，有许多共同之处。但是，二者在分析的对象、分析的目的及判断是非的依据等方面是不同的。

失效分析的对象是在使用中发生失效的产品。这些产品通常是经过出厂检验合格的，即符合技术标准要求的产品（在个别情况下也有漏检的废品）。分析的主要目的是寻找失效的原因。漏检和技术标准不合理都可能是失效的原因，如果属于后者，则应对技术标准进行修改。

废品分析的对象是不符合技术标准的产品及半成品。它所讨论的问题是产品及半成品为什么不符合技术标准的要求。至于产品的技术标准是否正确则不属于废品分析要解决的问题。

在失效分析时应将二者区分开来。例如，在分析某零件发生断裂的原因时，不能简单地根据该产品的某项技术指标不符合标准要求，就作为判断失效原因的依据。这一结论可能正确，也可能完全不正确。

例 模数为7mm的传动齿轮，采用20CrMnTi钢制造，经渗碳淬火与低温回火处理。技术要求是：渗碳层的硬度为58~63HRC，心部硬度为32~48HRC，马氏体及残留奥氏体不大于4级，渗碳层深度为1.3~1.5mm。该齿轮在使用中发生断齿失效，试分析断齿原因。

分析一 按技术要求对该齿轮进行常规检查，其结果是：渗碳层硬度为62HRC，心部硬度为42HRC，马氏体及残留奥氏体为3级，均符合要求，但渗碳层深度为1.1mm，不符合技术要求。对于这个齿轮，如果在出厂前发现渗碳层深度低于技术要求而判为不合格品，这是无可非议的。但是现在要处理的问题是齿轮为什么发生断齿，那就不能简单地认定是渗碳层深度不足而引起的。

分析二 按失效分析的观点，在进行上述常规检查后应做进一步分析。分析表明，断口为宏观脆性断裂（掉下的齿形呈凸透镜状），众多初裂纹源于表面加工缺陷处。经快速扩展后引起断裂，属过载类型的宏观脆性断裂。根据上述分析，该齿轮断齿失效是由于齿根加工质量不良产生的严重应力集中引起的。其改进措施应是提高齿根的加工质量、减少应力集中及防止过载。实践证明，这一分析结论是正确的。按照分析一的观点，如果增加渗碳层的深度至1.3~1.5mm，虽然符合技术要求，但由于渗碳层的脆性进一步加大，不但解决不了此类断齿问

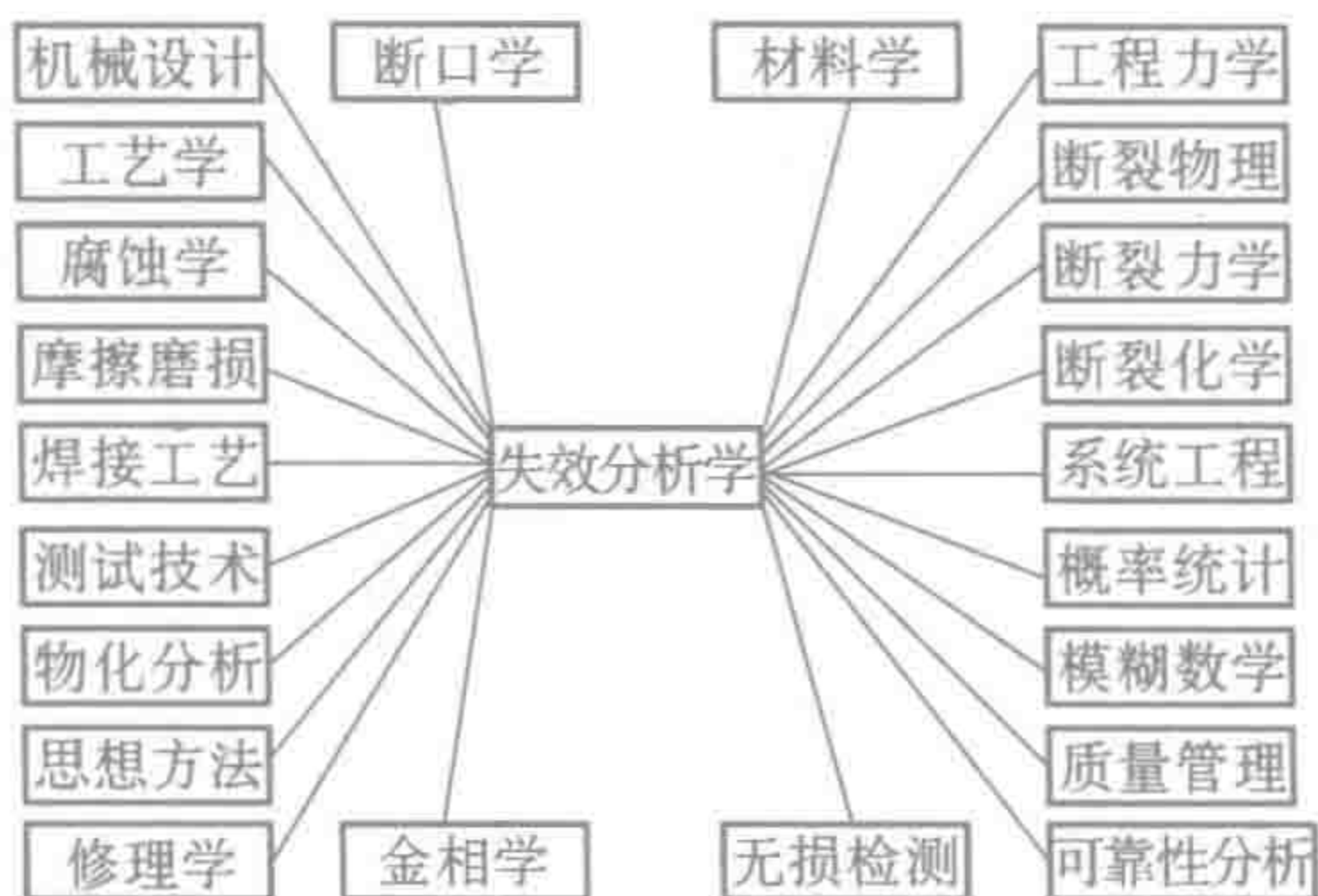


图 1-1 失效分析学与其他学科的关系

题，而且会增加此类断齿的危险性。

同样，失效分析所进行的研究工作也不能等同于某一学科某一问题的实验研究和理论分析。失效分析研究工作侧重点在于一个零件所发生的具体失效原因和失效过程，具有很强的工程针对性和适时性；而一般的实验研究目的带有一定的普遍性。普遍性的研究可以作为失效分析的理论基础，而失效分析又可以成为理论研究的出发点，两者既有区别，又相互联系，相互促进。例如，一个零件发生脆性断裂，初步分析有回火脆性的可能。失效分析的过程就是确定该零件所用材料的回火脆性特点和零件的回火工艺，是否具备回火脆性断裂的特征和条件，同时要考察零件的加工、安装、使用历史，从而得出结论。而同一种材料的回火脆性特性的研究则可以不考虑加工、使用等因素，可以在实验室条件下揭示材料发生回火脆性的本质、条件及影响因素。

1.2 失效分析的社会经济效益与意义

1.2.1 失效分析的社会经济效益

失效分析的巨大社会经济效益是显而易见的，它主要表现在以下几个方面。

1. 失效将造成巨大的经济损失

表 1-1 是根据 1998—2015 年国家质检总局关于全国特种设备安全状况通报，进行的锅炉、压力容器、压力管道和气瓶发生严重事故以上的数据统计。

表 1-1 1998—2015 年我国锅炉、压力容器、压力管道和气瓶发生严重事故以上数据统计

年度	事故总数	锅炉事故 (含土锅炉)	压力容器 事故	压力管道 事故	气瓶事故	死亡人数	受伤人数
1998	427	317	43	21	46	127	520
1999	288	192	47	15	34	131	512
2000	306	209	36	18	43	175	368
2001	186	95	40	10	41	158	342
2002	139	68	25	13	33	117	245
2003	159	66	43	17	33	114	281
2004	156	62	32	16	46		
2005	133	43	43	13	34	117	211
2006	109	38	36	9	26	114	277
2007	109	38	29	9	33	125	

(续)

年度	事故总数	锅炉事故 (含土锅炉)	压力容器 事故	压力管道 事故	气瓶事故	死亡人数	受伤人数
2008	75	33	22	5	15		
2009	90	34	21	9	26		
2010	60	27	18	5	10		
2011	95	41	21	6	27		
2012	89	29	26	8	26		
2013	69	26	18	9	16		
2014	81	22	19	12	28		
2015	77	18	27	3	29		

产品发生失效后,往往造成整机的破坏甚至整个企业的生产停顿,由此将造成更大的间接损失。举例如下:

1999年10月,某化工企业试生产时阀门爆炸,导致国家级建设项目停产,遭受600多万元的直接损失。

2015年4月,由于管道焊接质量问题,腾龙芳烃(漳州)有限公司二甲苯装置发生爆炸着火重大事故,造成6人受伤,直接经济损失9457万元。

一台1000MW发电机组停机一天,其综合损失就达240万元,而这些停机往往是一根过热器管或导气管开裂引起的,其成本只有几百元。

油套管是在抽油机采油工艺技术中大量使用的管具,在使用过程中经常会在连接螺纹处发生疲劳断裂、漏失、挤毁、破损、偏磨、腐蚀等失效,如长庆油田截止1996年底已有500多口井发生了不同程度的损伤,且每年以7%~10%的损伤率增加,管体也会因腐蚀而减薄甚至穿孔,导致管柱强度降低、材料耐蚀性下降、套压急剧上升、环空出水等现象。这严重影响了抽油机井的正常生产,并造成巨大的经济损失。

除此之外,机械产品的失效除造成本企业的损失外,往往引起相关企业的停产或减产,其实际损失往往比估算的还要大。至于失效引起的人员伤亡事故,更是难以用经济数字来表示的。

2. 质量低劣、寿命短导致重大经济损失

一些量大面广的机械产品,由于质量低劣,使用寿命大大缩短,也将造成巨大的经济损失。

齿轮、轴承、弹簧、轴及紧固件、工模具等是机械工业的基础件。一个具体件的失效,往往并不造成多大的经济损失,但是由于量大、涉及面广且失效频

繁，由此而造成的经济损失也是十分巨大的。《中国制造 2025》明确规定，尽快提升我国基础零件、基础材料和基础工艺水平，以期在此方面取得大的突破。

20 世纪 80 年代，我国钢产量仅为日本的 1/3，而高速工具钢的消耗却为日本的 3 倍，其重要原因之一，就是工模具用钢不合理及工模具寿命低。热挤压用模具的寿命也有类似情况，我国不少厂家自制模具的使用寿命仅为日本进口模具的 1/3。除了模具的正常磨损等失效外，由于工艺原因造成的早期断裂占了相当大的比例。

当前，多数已经进入应用领域的 MEMS 器件或者正在研制的其他微机械器件将在其所应用的系统中起着非常重要的作用，虽然 MEMS 器件本身价格便宜，但其失效造成的损失非常巨大，一个明显的例子就是应用于军事上的 MEMS 器件。

3. 提高设备运行和使用的安全性

一次重大的失效可能导致一场灾难性的事故。通过失效分析，可以避免和预防类似失效，从而提高设备安全性。设备的安全性问题是一个大问题，从航空航天器到电子仪表，从电站设备到旅游娱乐设施，从大型压力容器到家用液化气罐，都存在失效的可能性。2016 年我国某电厂发生的焊管爆裂导致 20 多人遇难的事故提醒我们，这方面的问题还必须继续重视。通过失效分析确定失效的可能因素和环节，从而有针对性地采取防范措施，则可起到事半功倍的效果。如对于一些高压气瓶，通过断裂力学分析知道，要保证气瓶不发生脆性断裂（突发性断裂），必须提高其断裂韧度，通常采用高安全设计来确定零件尺寸。这样，即使发生开裂，在裂纹穿透瓶壁之前，也不会发生突然断裂。容器泄露后，易于发现，不至于酿成灾难性事故。

从上述事例中可以看到，机械产品的失效不仅造成巨大的、直接的经济损失，而且会造成更大的、间接的经济损失及人员伤亡。重大的工程零件的失效是如此，许多量大面广的、往往不被人们注意的小型零件的失效也是如此。但是，无论是哪种类型的失效，通过失效分析，明确失效模式，找出失效原因，采取改正或预防措施，使同类失效不再发生，或者把产品的失效限制在预先规定的范围内，都可挽回巨额的经济损失，并可获得巨大的社会效益。

1.2.2 失效分析的意义

1. 失效分析有助于提高管理水平和促进产品质量提高

有些产品在使用中之所以会失效，常常是由于产品本身有缺陷，而这些缺陷在大多数情况下在出厂前是可以通过相应的检查手段予以发现的。但是由于出厂时漏检而进入市场，这就表明工厂的检验制度不够完善或者检验的技术水平不够高。

产品在使用中发生的早期失效，有相当大的部分是因为产品的质量有问题。

通过失效分析,将其失效原因反馈到生产厂并采取相应措施,将有助于产品质量的不断提高。这一工作是失效分析和预防技术研究的重要目的和内容。

有些产品在加工制造中留下了较大的加工刀痕,或热处理工艺控制不当形成了不良组织,在以后的服役过程中,断裂源就在此处产生,从而导致早期断裂。例如:某发电厂使用的灰浆泵,在一年内连续出现灰浆泵主轴断裂,最严重时,一根主轴使用时间不到24h。经分析,主轴均为疲劳断裂,是由于表面加工刀痕过大引起的。对20CrMo嘉陵摩托车连杆断裂的失效分析表明,热处理过程中在连杆表面形成粗大的马氏体针状组织是导致断裂的主要原因。

随着深层含CO₂油气藏的开发,应用于含CO₂油气水多相环境中的集输管道出现了越来越多的失效问题。针对多相混输管道失效问题的研究,在应用中存在着较大的局限性。如我国某高温高压凝析气田,由于缺乏相关系统理论指导,投产1年多以来,碳钢集输管线多次出现局部壁厚严重减薄现象(12mm/a),以及刺漏、穿孔等事故,平均3~5月就要更换1次,影响正常生产,并存在安全隐患。应用失效分析理论、流体动力学理论、数值模拟方法及现场试验,分析CO₂腐蚀的失效机理及其作用规律,使类似油气田的开发得以更顺利进行。

通过失效分析,切实找出导致零件失效的原因,从而提出相应的有效措施,提高产品的质量和可靠性。如某坦克厂生产的扭力轴,长期存在着疲劳寿命不高的质量问题。该厂曾多次改进热处理工艺及滚压强化措施未能得到显著效果。后来利用失效分析技术,发现疲劳寿命不高的主要原因是钢中存在过量的非金属夹杂物,将此信息反馈到冶金厂,通过提高冶金质量,使扭力轴的疲劳寿命由原来的10万次左右提高到50万次以上。某碱厂购进的40Cr钢活塞杆在试车时就发生断裂,经过对断裂活塞杆的失效分析,提出了改进热处理工艺的措施。经改进热处理工艺的活塞杆使用近一年后没有出现任何问题。

在材料的研究过程中,由于钢材中过量氢的存在而引起的氢脆,促使真空冶炼和真空浇注技术的出现,从而大大提高了钢材的冶金质量。不锈钢的晶间腐蚀断裂,可以通过降低钢中的含碳量或利用加钛和铌来稳定碳的办法予以解决。这些措施的提出是由于失效分析发现,不锈钢的晶间腐蚀是由于碳化物沿晶界析出引起的。

目前,日本的某些产品在国际市场有很大的竞争力,比如日本的汽车冲击着整个世界市场,其实早在20世纪60年代初期,日本就对各国生产的汽车,特别是关键的零部件进行分析并加以比较,为改进本国的产品提供了科学的依据,从而使其产品很快地进入世界先进行列。早在20世纪70年代,德国拜尔轻金属厂(BLW)的精锻齿轮产量就达到了年产1000万件的水平,而我国在20世纪60年代就开始了精锻齿轮的研究,但至今生产水平不高,其主要原因之一是模具使用寿命低。统计表明约有80%属于磨损、塌陷等正常失效,而另外的20%则属于